

たたき土の地盤工学的性質に関する考察

Considerations in Geotechnical Characteristics of 'Tataki' Soil

竹下祐二 Yuji TAKESHITA (岡山大学大学院環境学研究科)
 谷本康太 Kota TANIMOTO (広成建設(株)岡山支店土木部土木課)
 大山孝政 Takamasa OYAMA (岡山大学大学院環境学研究科)
 田村二郎 Jiro TAMURA (岡山県共同石灰(株)技術部・生産部)

近年、低品質土の安定処理にはセメント系固化材が使用されるが、強度のみならず環境に配慮した性能を考慮することも重要である。そこで、環境にやさしい土質改良方法の検討を目的として、たたき工法に着目した。たたき工法とは、母材となる土に消石灰とにがり（苦汁）を添加して、適量の水を加えて練り混ぜ、叩き固めて、たたき土を造る工法である。たたき工法は日本古来の伝統的な左官技術として多用されていたが、たたき土の硬化特性などは十分に解明されていない。本文では、異なる母材を用いてたたき土を作成し、室内土質試験を行って、その地盤工学的特性を考察した。

キーワード：たたき土，にがり，消石灰，土質安定処理

(IGC:D-10)

1. はじめに

建設発生土や低品質な土の有効利用は、建設材料の確保や環境保全等の観点から、重要な課題であると言える。一般に、低品質土の安定処理にはセメント系固化材の使用が考えられるが、この場合、強度のみならず環境に配慮した性能を考慮することも重要であると思われる。たとえば、公園や遊歩道の施工、または、遺跡・史跡等の文化遺産の保存や修復などでは、必ずしも高強度は必要なく、自然景観に調和し、長期間の使用に耐えた後、やがて自然に帰る環境にやさしい地盤材料の適用が望ましい。

本研究では、環境にやさしい土質改良方法の検討を目的として、たたき工法に着目した。たたき工法とは、母材となる土に消石灰とにがり（苦汁）を添加して、適量の水を加えて練り混ぜ、板や木槌などで叩き固める方法である。叩き固められた土は、たたき土（敲き土、叩き土）と呼ばれている。たたき土は、セメント系添加材による固化処理土に比べて高強度は望めないが、家の玄関や土間、塀などの小規模の土構造物に多用されてきた^{1),2)}。たたき工法は日本古来の伝統的な左官技術として、石灰岩の産地周辺で多用されていたようであるが、たたき土の硬化特性などは十分に解明されていないのが現状である。本文では、たたき土の地盤工学的特性に関する基礎資料を得ることを目的として、土質特性の異なる土を母材として用いてたたき土を作成し、室内土質試験を実施した結果を報告する。

2. 使用材料の物理特性

たたき土の母材としては、花崗岩・安山岩などの風化した土や、風化した砂利の混ざった粘土質の土が使用されていたようである³⁾。そこで、本研究では、母材としてま

表-1 黒ぼく土の化学組成

化学組成 (%)								A _s	pH	w ₀ (%)
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	有機物類	(g/cm ³)		
17.1	56.8	5.7	2.5	1.2	1.0	0.9	15.0	2.4	6.9	50.0

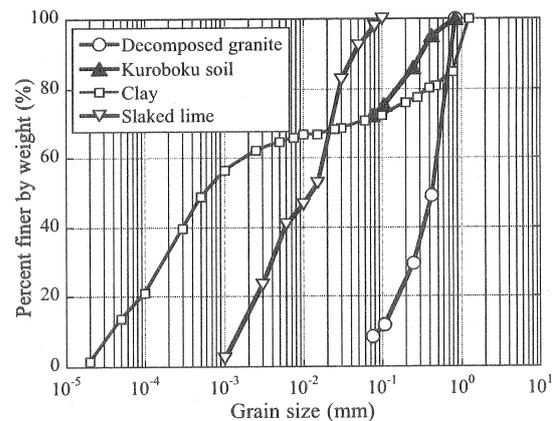


図-1 使用材料の粒径加積曲線

さ土、粘性土、そして、黒ぼく土の3種類の土を選定した。まさ土は花崗岩質岩の風化土であり、近畿、中国、四国地方に広く分布し、建設材料としても多用されている。今回は、岡山県内で採取され、建設材料として市販されているまさ土を使用した。粘性土としては岡山県北部に位置する阿哲石灰台地の岩石中に介在する土を採取した。この土は塑性図上で粘土（高液性限界）(CH)に分類される。一方、黒ぼく土は有機質土であり、一般に、その力学的特性は不良で安定処理効果が低いために建設材料としての利用価値が低く、通常では置換対象とされる土である。本研究では、たたき工法の適用性を検討する目的で母材として採用し、岡山県新見市の山林部にある畑地にて採取した。表-1に用いた黒ぼく土の化学組成を示した。また、実験に用いた各母材の粒径加積曲線を図-1に示す。なお、まさ土

と黒ぼく土はふるい分析による粒度試験のみを実施した。

たたき工法においては、通常、固化材および固化調整剤として消石灰およびにがりを使用されている。にがりとは塩化マグネシウムの水溶液であり、一般には海水から塩を作る際にできる余剰なミネラル分を多く含む液体として知られている。塩化マグネシウムは化学式 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ の白色結晶体で、通常は6水和物として存在する⁴⁾。その比重は無水物で2.325、また、6水和物では1.569である。塩化マグネシウムは潮解性があり、水に極めて溶けやすい性質を有している。その一般的な用途としては、豆腐の製造において豆乳を固める凝固剤、肥料等の製造、凍結防止剤、防塵剤の原料などである。本研究では、にがりとして市販の塩化マグネシウム6水和物の固形粉末試薬を用いた。また、消石灰は岡山県新見市で生産されたものを用いた。

3. にがりによる土の物性改良効果

にがりはたたき土の固化調整剤的な効果を有していると考えられるが、その地盤工学的な効果については明確ではない。そこで、にがりを加えることによる土の物性改良効果を考察するために、にがりのみを母材となる土に添加して、締固め試験、液性限界・塑性限界試験を行った。にがりの添加に際しては、所定量（乾燥重量比で母材の0～5%）の塩化マグネシウム6水和物固形粉末試薬をイオン交換精製水に溶解させ、その水溶液を炉乾燥した母材に加えて十分に攪拌した。

にがりを溶解させるイオン交換精製水の量は、各試料が所定の含水比になるように調整する必要がある。ここで、塩化マグネシウム6水和物は1molあたり、約半分以上が水和物 ($MgCl_2 : 95.21g/mol, 6H_2O : 108.096g/mol$) であるため、水に溶解させた場合には、その水和物はイオン化し、水として存在すると考えられる。そこで、試料の含水比の算出に際しては塩化マグネシウム6水和物の6水和部分 ($6H_2O$) は、水分量に相当すると考えてイオン交換精製水の量を調整した。以後、本文にて示す図表中では、にがりとして用いた塩化マグネシウム6水和物を $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ と表記する。

3.1 締固め特性

まさ土試料を用い、セメント系固化材による安定処理土の試験方法（セメント協会標準試験方法 JCAS L-01-1990）⁵⁾ に基づき、突固めによる締固め試験（1.5kgランマー、1層目10回、2層および3層目各20回、4層目40回、乾燥法、非繰り返し法）を行った。得られた締固め曲線を図-2に示す。これによれば、にがりの添加量に依存して最大乾燥密度は増大し、最適含水比は低くなる傾向が認められる。

また、粘土試料を用いて、上記の締固め試験の突固め回数を表-2のように変化させ、異なる締固め仕事量によっ

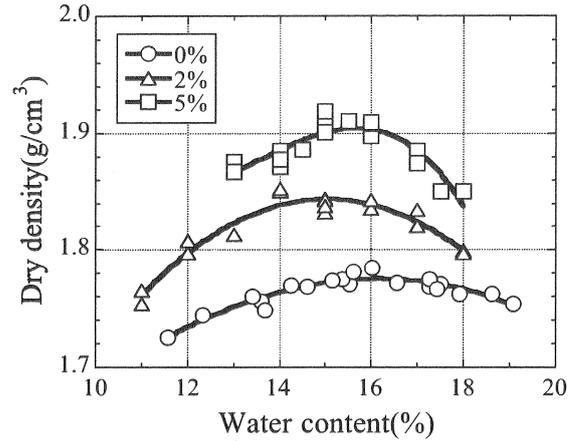


図-2 にがり添加による締固め曲線の変化（まさ土）

表-2 締固め仕事量（粘土試料）

Case	各層の突固め回数					締固め仕事量 (kJ/m³)
	1層	2層	3層	4層	計	
1	5	10	10	20	45	674
2	3	5	5	10	23	337
3	2	3	3	7	15	225

て締固め試験を行い、得られた締固め曲線を図-3～図-5に示す。なお、締固め仕事量 E_c は次式によって算出した⁶⁾。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (1)$$

ここに、 W_R ：ランマーの重量(kN)、 H ：ランマーの落下高さ(m)、 N_L ：層数、 N_B ：1層当りの突固め回数、 V ：モールドの容積(m^3)である。

一般に、締固め仕事量の増加により最大乾燥密度が増大し、最適含水比の低下する現象⁶⁾が知られているが、にがりを添加した場合、図-4および図-5によれば締固め仕事量をCase1の約1/2としたCase2では、その締固め曲線の形状はCase1の締固め仕事量の場合と比較してほとんど変化していない。一方で、締固め仕事量をCase1の約1/3としたCase3では、締固め曲線の形状はCase1およびCase2のそれと比較して有意な差異が認められている。したがって、にがりを添加することによって締固め特性が向上し、締固め仕事量が多少、少ない場合でも、締固め効果が期待できるものと思われる。また、このことから、たたき土の施工品質における締固め仕事量のばらつきの影響は、にがりを添加することにより低減されるものと期待される。

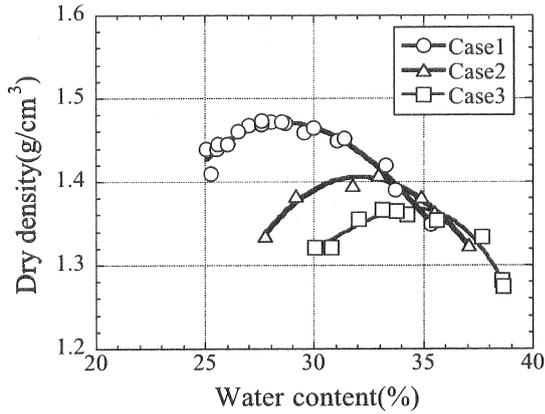


図-3 粘土試料の締固め曲線 (にがり 0%)

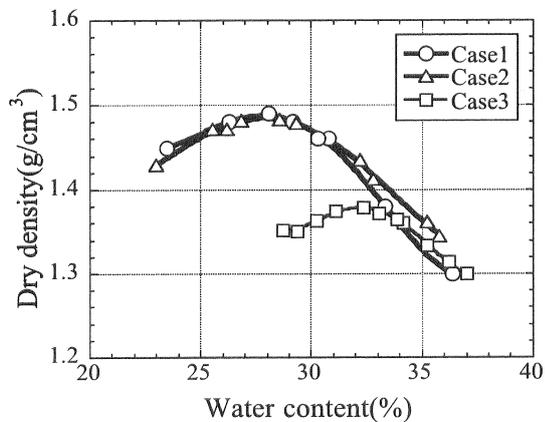


図-4 粘土試料の締固め曲線 (にがり 2%)

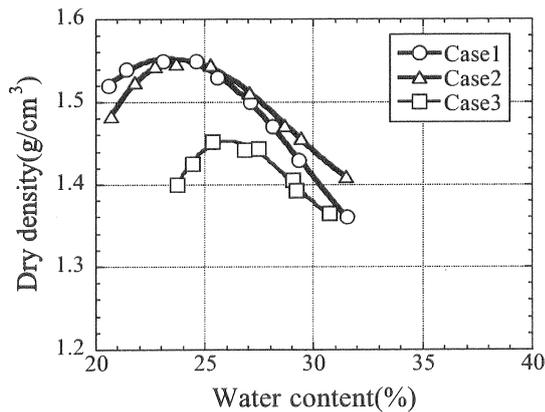


図-5 粘土試料の締固め曲線 (にがり 5%)

3.2 液性限界および塑性限界

母材として粘土および黒ぼく土を用い、液性限界および塑性限界試験 (JIS A 1205) を行った。にがりの添加量による液性限界および塑性限界の変化を図-6 に、また、塑性指数の変化を図-7 に示した。これらの図によれば、塑性指数には有意な変化は認められないが、液性限界と塑性

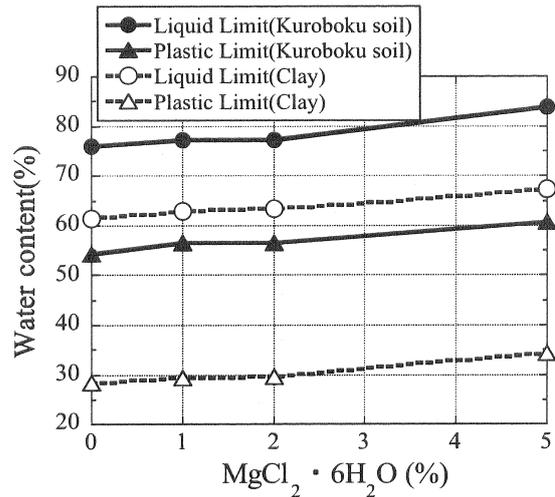


図-6 にがり添加による液性・塑性限界の変化

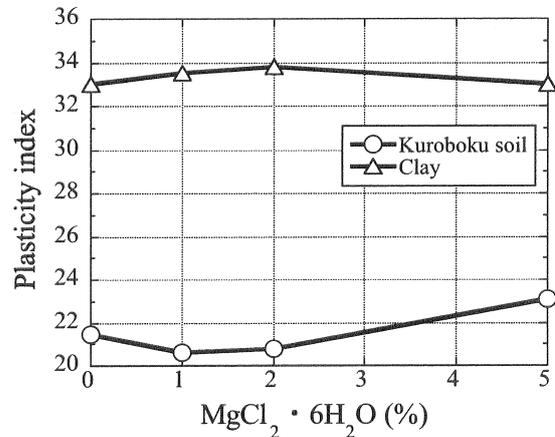


図-7 にがり添加による塑性指数の変化

限界はにがりの添加量に依存してともに増加する傾向にある。このことから、にがりを添加すれば、試料の圧縮性が増加すると思われる。

以上の結果より、にがりを添加することにより、たたき土の締固め特性が向上し、たたき土の圧縮性が増加する効果が得られると思われる。これらは主ににがりのもつ凝固作用の影響によるものと推測される。

4. たたき土の力学的特性

4.1 一軸圧縮強さ

(1) 供試体の作成方法

乾燥させた各母材料に所定量の消石灰を混合した後、前述のように精製水で溶解させた所定濃度の $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 溶液を各母材料の最適含水比に相当する量だけ加え、電動ミキサーを用いて5分間練り混ぜ、たたき土の材料を作成した。これらを直径 5cm、高さ 10cm のモールドに入れ、1.5kg ランマーを 20cm 自由落下させて、1層目 5回、2層および3層目各 10回、4層目 20回の計 45回の動的締固

表-3 まさ土を用いた供試体の配合表

Case	Deconposed granite (%)	Slaked lime (%)	MgCl ₂ ·6H ₂ O (%)
A1	100	0	0
B1	95	5	0
C1	94.5		0.5
D1	94		1
E1	93		2
F1	90		5
G1	85		10

(各材料の配合比は乾燥重量比)

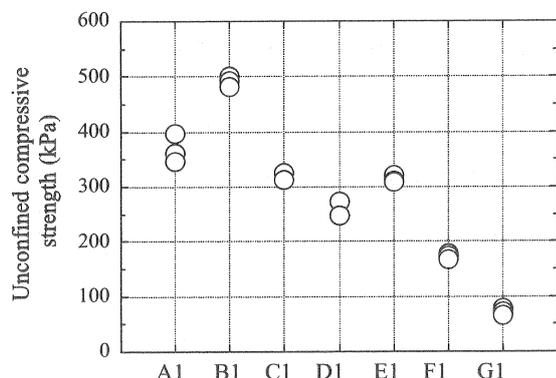


図-8 一軸圧縮強さの比較 (母材:まさ土)

表-4 粘土を用いた供試体の配合表

Case	Clay (%)	Slaked lime (%)	MgCl ₂ ·6H ₂ O (%)
A2	100	0	0
B2	95	5	0
C2	94.5		0.5
D2	94		1
E2	93		2
F2	90		5

(各材料の配合表は乾燥重量比)

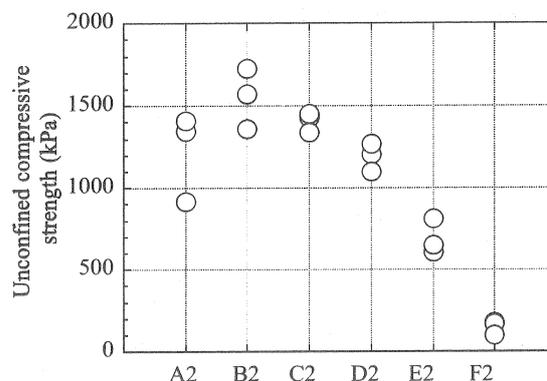


図-9 一軸圧縮強さの比較 (母材:粘土)

め方法にて一軸圧縮試験用の供試体を作成した。供試体の養生は恒温槽 (温度 20℃, 湿度 80%) にて行った。

(2) 母材がまさ土の場合

供試体の配合条件を表-3 に示す。各供試体の初期含水比は母材のまさ土の最適含水比 16%とした。養生期間 7 日の供試体にて計測された一軸圧縮強さを図-8 に示す。にがりの添加量が増加するに従い、一軸圧縮強さが低下する結果が得られており、その添加量が 5%以上の供試体では一軸圧縮強さに大きな低下が見られる。なお、供試体 B1～G1 における pH の測定結果は 12.8 程度であり、有意な差違は認められず、消石灰の添加に起因する強アルカリ状態を示した。

(3) 母材が粘土の場合

供試体の配合条件を表-4 に示す。供試体の初期含水比は母材の粘土における最適含水比 28%とした。養生期間 7 日の供試体にて計測された一軸圧縮強さを図-9 に示す。母材がまさ土の場合と同様に、にがりの添加量が増加するに従い、一軸圧縮強さが低下する結果が得られ、添加量が 5%の供試体では一軸圧縮強さが大きく低下している。供試体 B2～F2 における pH の測定結果は 12.6 程度であり、有意な差違は認められず、消石灰の添加に起因する強アルカリ状態を示した。

(4) 母材が黒ぼく土の場合

供試体の配合条件を表-5 に示す。供試体作成時の含水

表-5 黒ぼく土を用いた供試体の配合表

Case	Kuroboku soil (%)	Slaked lime (%)	MgCl ₂ ·6H ₂ O (%)
A3	100	0	0
B3	95	5	0
C3	94.5		0.5
D3	94		1
E3	93		2

(各材料の配合表は乾燥重量比)

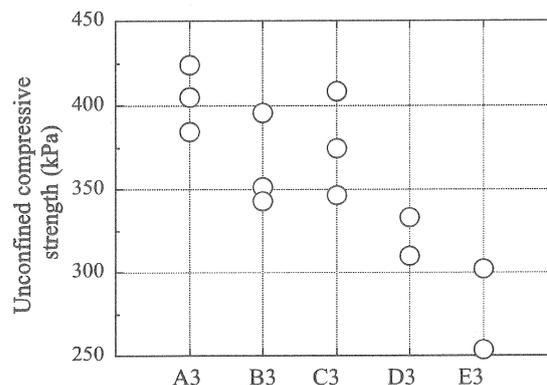


図-10 一軸圧縮強さの比較 (母材:黒ぼく土)

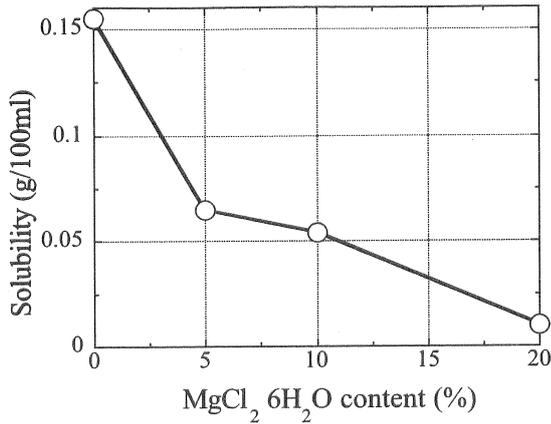


図-11 にがり溶液に対するCa(OH)₂の溶解度

比は母材の黒ぼく土における最適含水比40%とした。養生期間7日の供試体の一軸圧縮強さを図-10に示す。供試体B3では供試体A3に比較して、一軸圧縮強さがやや低下する傾向が得られており、消石灰の添加による初期強度発現は得られず、黒ぼく土では石灰による安定処理効果が低いことが認められる。今回の試験では供試体C3に関しては、多少ばらつきがあるものの、供試体B3をわずかに上回る一軸圧縮強さが得られている。これはにがりによる効果の影響であると思われるが、供試体D3や供試体E3では、にがりの添加量に依存して一軸圧縮強さが低下する結果が得られている。これは、母材がまさ土や粘土の場合と同様の傾向であるが、黒ぼく土の場合、にがりの添加量が1%以上で一軸圧縮強さが大きく低下している。

(5) にがりの添加が石灰安定処理に及ぼす影響

一般に、消石灰による短期的な土質安定処理効果としては、イオン交換反応が考えられる。これは消石灰が土中水に溶解し、カルシウムイオンが土粒子表面に付着している水素イオン、ナトリウムイオン、カリウムイオンとイオン交換し、土粒子表面に吸着して土粒子表面の帯電状態が変わるため土粒子の電氣的凝集や団粒化が生じる現象である⁷⁾。図-11は20℃におけるMgCl₂ · 6H₂O溶液への消石灰の溶解度を分子量に基づいて算出した結果であるが、MgCl₂ · 6H₂Oの濃度の増加により、消石灰の溶解度は減少することから、消石灰中のカルシウムはイオン化し難い状態になると思われる。たたき土の作成に際して、にがりの添加量を増加させた場合に短期的な一軸圧縮強さが低下する原因は、カルシウムイオン交換反応による土粒子の電氣的凝集や団粒化現象が緩慢になり、消石灰の安定化反応を阻害するためであると思われる。

4.2 透水性

まさ土を母材として、一軸圧縮試験用の供試体と同様の混合方法および締め固め方法により直径5cm、高さ5cmの供試体を作成した。供試体作成時の乾燥密度は1.74g/cm³、間隙比は0.51である。これらの供試体を恒温槽(温度20℃、

表-6 透水係数の比較(母材:まさ土)

Decomposed granite (%)	Slaked lime (%)	MgCl ₂ · 6H ₂ O (%)	Saturated hydraulic conductivity (cm/s)	
			7days	14days
100	5	-	3.5 × 10 ⁻⁵	-
95			1.6 × 10 ⁻⁵	3.5 × 10 ⁻⁵
93		2	1.6 × 10 ⁻⁵	1.4 × 10 ⁻⁵
90		5	1.5 × 10 ⁻⁶	2.7 × 10 ⁻⁶
85		10	5.2 × 10 ⁻⁷	3.9 × 10 ⁻⁷

(各材料の配合比は乾燥重量比)

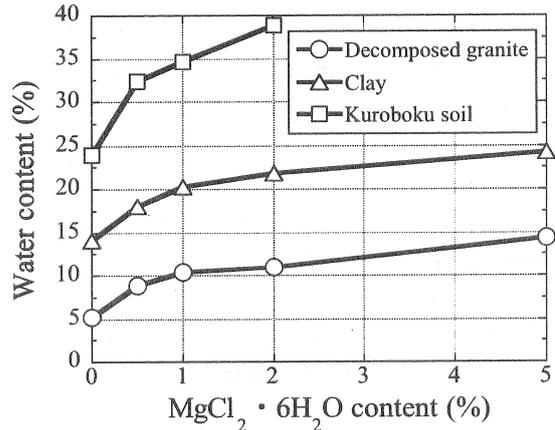


図-12 にがり添加による含水比の変化(養生7日後)

湿度80%)において養生し、養生期間7日および14日において変水位透水試験(JIS A 1218)を実施した。透水試験実施時には、供試体の飽和度を高めるため水浸脱気法⁸⁾を用いた。

供試体の配合条件と測定された飽和透水係数を表-6に示す。乾燥重量比で2%のにがりを添加した場合には、母材の透水係数の約1/2に低下し、5%のにがりを添加した場合には、母材の透水係数よりも約1オーダー低下する結果が得られた。これは、にがりの有する凝固作用によるものであると考えられる。養生期間の経過により消石灰を添加したことによる化学反応が進み、炭酸化合物や水和物が間隙を充填すると予想されるが、今回は養生期間が短いため、養生日数による透水係数の変化はほとんど見られない。

4.3 保水性

一軸圧縮試験後の各供試体を利用して、養生7日後の含水比を測定した結果を図-12に示す。いずれの母材の場合にも、にがりの添加量に応じて含水比の低下は抑制される傾向が認められる。したがって、たたき土において、にがりの添加はたたき土の保水性を向上させ、消石灰による中・長期的な土質安定処理効果であるポズラン硬化反応や炭酸化反応⁷⁾が促進させるために、たたき土の中・長期的な強度発現に有用であると期待される。

5. まとめ

本研究では、たたき土の地盤工学的特性に関する基礎資料を得ることを目的として、まさ土、粘土、黒ぼく土の3種類の母材料を用いてたたき土を作成し、室内土質試験を実施した。得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) たたき工法において、にがりの添加により、たたき土の締固め特性の改善や液性限界、塑性限界の上昇による土の圧縮性の向上が期待できる。これはにがりのもつ凝固作用の影響によるものと推測される。
- 2) まさ土、粘土、黒ぼく土のいずれにおいても、作成したたたき土の一軸圧縮強さは、にがりの添加量に応じて低下する傾向にある。今回の実験では、各母材に対するにがりの添加量が乾燥重量比で、まさ土および粘土に対して2%、黒ぼく土に対して0.5%より多くなれば、顕著な強度低下が認められた。にがりの添加量を増加させた場合に短期的な一軸圧縮強さが低下する原因は、カルシウムイオン交換反応による土粒子の電氣的凝集や団粒化現象が緩慢になり、消石灰の安定化反応を阻害するためであると思われる。
- 3) 母材にまさ土を用いたたたき土の透水性は、にがりの添加量に応じて低下する。乾燥重量比で2%のにがりを添加した場合には、母材の透水係数の約1/2に低下し、5%のにがりを添加した場合には、母材の透水係数よりも約1オーダー低下する結果が得られた。また、養生日数による透水係数の変化は、2週間程度の短期間養生では、ほとんど見られなかった。
- 4) にがりの添加量に応じて、たたき土の保水性が向上するため、消石灰による中・長期的な土質安定処理効果であるボゾラン硬化反応や炭酸化反応が促進され、たたき土の中・長期的な強度発現が期待される。
今後は、中・長期養生後のたたき土の強度特性および透水性などについて、検討する必要があると考えられる。

謝辞：

本研究の実施に際し、(財)八雲環境科学振興財団より平成17年度環境研究助成金の交付を受けました。また、土質試験の実施に際しては、岡山県共同石灰(株)石井正師氏、成田豊氏、伴藤勇氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大橋公雄：人造石(たたき)工法とその遺構-服部長七の業績と人造石の歴史的価値-，産業遺産研究第5号，論文・調査報告，pp.44-62, 1998.
- 2) 飯塚一雄：日本の産業遺産-産業考古学研究，玉川大学出版部，pp.130-154, 1986.
- 3) 藤田洋三：石灰の残した文化遺産 漆喰と石灰，LIME・石灰，日本石灰協会，pp.33-38, 2005.
- 4) 化学工業日報社，13700の化学商品，第3類無機薬品，p.166, 2003.
- 5) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第二版)，セメント協会，pp.381-395, 1999.
- 6) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説(第一回改訂版)，pp.252-256, 2000.
- 7) 日本石灰協会：石灰安定処理工法 設計・施工の手引き，pp.18-21, 2005.
- 8) 前掲6)，p.336

(2006年6月28日 受付)